

Studi Numerik Optimasi Analisis Aerodinamika dengan Memvariasikan Jumlah Grid dan kecepatan

Thathip Nur Khafid¹, Hisyam Ma'mun², Muhammad Safi'i^{3*}


^{1,2,3}Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Informatics, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia Semarang, Central Java 50232, Indonesia

Email: ¹thatipa5@email.com, ²muhammadsafii@upgris.ac.id, ^{3,*}hisymmamun@upgris.ac.id

Email Penulis Korespondensi: ¹muhammadsafii@upgris.ac.id

Info Artikel	Abstrak
Kata Kunci: Computational Fluid Dynamics (CFD) Distribusi Tekanan Aerodinamis Drag Force, Lift Force, Grid Independence	Penelitian ini menganalisis karakteristik aerodinamika bus menggunakan simulasi <i>Computational Fluid Dynamics</i> (CFD) melalui variasi jumlah grid dan variasi kecepatan aliran. Uji independensi grid dilakukan pada kecepatan 100 km/jam dengan jumlah grid 500.000, 1.000.000, 1.500.000, dan 2.000.000 sel untuk mengevaluasi kestabilan koefisien aerodinamika. Hasil uji menunjukkan koefisien drag (Cd) menurun dari 0,943 pada grid 500 menjadi 0,743 pada grid 2.000.000, sedangkan koefisien lift (Cl) relatif stabil pada rentang 0,118–0,127, sehingga grid 2.000.000 dipilih untuk simulasi lanjutan. Validasi numerik terhadap data eksperimen pada variasi kecepatan 100–140 km/jam menunjukkan Cd numerik berada pada rentang 0,703–0,743, sementara Cd eksperimen berada pada rentang 0,608–0,664. Nilai Cl numerik berada pada rentang 0,121–0,127, sedangkan Cl eksperimen berada pada rentang 0,107–0,112. Secara umum, hasil simulasi menghasilkan Cd dan Cl yang cenderung lebih tinggi dibanding eksperimen, namun deviasinya relatif konsisten pada seluruh variasi kecepatan, sehingga model CFD dapat digunakan untuk analisis kecenderungan aerodinamika bus.
Keywords: Computational Fluid Dynamics (CFD) Pressure Distribution Aerodinamis Drag Force, Lift Force, Grid Independence	Abstract This study analyzes the aerodynamic characteristics of a bus using <i>Computational Fluid Dynamics</i> (CFD) by varying the mesh resolution and the flow speed. A grid-independence test was performed at 100 km/h using four mesh sizes, namely 500,000, 1,000,000, 1,500,000, and 2,000,000 cells, to assess the stability of the aerodynamic coefficients. The results indicate that the drag coefficient (Cd) decreases from 0.943 for the 500-cell mesh to 0.743 for the 2,000,000-cell mesh, while the lift coefficient (Cl) remains relatively stable within 0.118–0.127; therefore, the 2,000,000-cell mesh was selected for subsequent simulations. Validation against experimental data at speeds of 100–140 km/h shows that the numerical Cd ranges from 0.703 to 0.743, whereas the experimental Cd ranges from 0.608 to 0.664. The numerical Cl ranges from 0.121 to 0.127, while the experimental Cl ranges from 0.107 to 0.112. Overall, the CFD results tend to overpredict Cd and Cl compared to the experimental measurements; however, the deviation remains relatively consistent across the tested speed range, indicating that the CFD model can be used to analyze the bus aerodynamic trends.

JuKSIT is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License



1. PENDAHULUAN

Perkembangan transportasi darat menuntut kendaraan penumpang, khususnya bus, untuk memiliki performa yang tidak hanya baik dari sisi kapasitas dan kenyamanan, tetapi juga efisien dalam penggunaan energi serta stabil pada kecepatan operasi yang tinggi. Salah satu faktor yang sangat memengaruhi performa tersebut adalah karakteristik aerodinamika kendaraan, karena interaksi aliran udara dengan bodi menghasilkan distribusi tekanan yang kompleks dan memunculkan hambatan aerodinamis serta kecenderungan gaya angkat yang dapat memengaruhi kestabilan [1]. Dalam kajian aerodinamika kendaraan, besaran tersebut umumnya dinyatakan dalam bentuk koefisien, yaitu koefisien drag (Cd) dan koefisien lift (Cl), sehingga hasil dapat dibandingkan lintas kondisi operasi maupun terhadap data eksperimen [2]. Pada kendaraan berukuran besar seperti bus, kontribusi hambatan tekanan (pressure drag) cenderung dominan

akibat fenomena separasi aliran dan pembentukan wake, sehingga potensi dampaknya terhadap konsumsi energi dan kenyamanan penumpang menjadi signifikan [3].

Bus sebagai kendaraan layanan antarkota maupun pariwisata umumnya memiliki karakter *bluff body* dengan dimensi frontal besar, sehingga aliran di sekitar bodi mudah mengalami separasi terutama di area belakang. Kondisi ini membentuk wake dan vorteks yang memperbesar perbedaan tekanan antara depan dan belakang bodi, yang pada akhirnya meningkatkan drag serta dapat memengaruhi kestabilan arah ketika kendaraan melaju [4]. Oleh karena itu, analisis aerodinamika bus diperlukan untuk memahami perilaku aliran di sekitar kendaraan, mengidentifikasi area penyumbang drag dominan, serta memperoleh indikator Cd dan Cl yang representatif untuk kondisi operasi [5].

Metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) banyak digunakan dalam kajian aerodinamika kendaraan karena mampu memvisualisasikan distribusi kecepatan, garis aliran (*streamline*), dan kontur tekanan secara numerik dengan waktu dan biaya yang umumnya lebih efisien dibanding pengujian skala penuh di *wind tunnel* [6]. Namun, keandalan hasil CFD sangat dipengaruhi oleh aspek numerik dan pemodelan, terutama kualitas mesh, pemilihan model turbulensi, dan penetapan kondisi batas. Tanpa verifikasi numerik, nilai Cd dan Cl yang diperoleh dapat terpengaruh oleh ukuran grid sehingga interpretasi fenomena aliran dan kesimpulan performa aerodinamika menjadi kurang kuat [7]. Karena itu, studi CFD yang baik perlu memastikan bahwa solusi telah stabil terhadap pemurnian mesh melalui uji independensi grid sebelum hasil digunakan untuk analisis lebih lanjut [8].

Urgensi penelitian semakin meningkat ketika bus dioperasikan pada variasi kecepatan yang lebih tinggi, karena perubahan kondisi operasi dapat mengubah struktur aliran, karakter separasi, serta tingkat pembentukan wake. Konsekuensinya, beban aerodinamika yang terekam melalui Cd dan Cl dapat berubah dan berimplikasi pada efisiensi energi dan stabilitas kendaraan, yang pada kendaraan komersial akan terkait langsung dengan biaya operasional dan aspek keselamatan [9]. Dengan demikian, kajian yang mampu memetakan kecenderungan Cd/Cl terhadap variasi kecepatan sekaligus memverifikasi keandalan numeriknya memiliki nilai praktis yang tinggi.

Sejumlah penelitian terdahulu telah membahas aerodinamika kendaraan dan bus menggunakan CFD untuk menganalisis distribusi tekanan, pola aliran, serta pembentukan wake yang berkontribusi dominan terhadap drag. Secara umum, area depan kendaraan membentuk zona stagnasi bertekanan tinggi, sedangkan area belakang menjadi lokasi utama separasi aliran yang menghasilkan wake dan vorteks, sehingga menjadi target utama analisis maupun perbaikan desain [8]. Studi-studi bus juga menunjukkan bahwa perubahan geometri bodi dan/atau fitur aerodinamis tertentu dapat menggeser lokasi separasi serta mengecilkan wake, yang pada akhirnya dapat memperbaiki koefisien drag dan mendukung efisiensi energi [10]. Pada saat yang sama, banyak studi lebih menitikberatkan pada hasil akhir Cd/Cl dan visualisasi aliran, sementara pembahasan tentang pengaruh jumlah grid terhadap kestabilan koefisien serta konsistensi terhadap data eksperimen sering tidak dijelaskan secara memadai [11].

Berdasarkan kondisi tersebut, terdapat celah penelitian yang penting untuk diisi, yakni perlunya kajian bus yang menghubungkan dua aspek secara terpadu: pengaruh variasi kecepatan terhadap karakteristik aerodinamika serta pengaruh jumlah grid terhadap kestabilan dan keandalan hasil CFD. Uji independensi mesh diperlukan untuk memastikan bahwa nilai Cd dan Cl tidak bias terhadap ukuran mesh, sehingga analisis kontur tekanan, pola aliran, dan kesimpulan mengenai kecenderungan aerodinamika memiliki dasar numerik yang kuat [12]. Selain itu, validasi terhadap data eksperimen pada beberapa titik kecepatan diperlukan untuk menilai kewajaran prediksi model dan memperkuat kredibilitas hasil simulasi [13].

Tujuan penelitian ini adalah menganalisis karakteristik aerodinamika bus menggunakan metode CFD melalui variasi jumlah grid dan variasi kecepatan aliran. Secara khusus, penelitian ini bertujuan menentukan jumlah grid yang memadai melalui uji independensi mesh, menganalisis distribusi kecepatan, *streamline*, dan distribusi tekanan di sekitar bodi bus, serta mengevaluasi pengaruh variasi kecepatan terhadap koefisien drag (Cd) dan koefisien lift (Cl). Dengan tercapainya tujuan tersebut, diharapkan diperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai perilaku aerodinamika bus pada rentang kondisi operasi yang diuji, sekaligus memberikan landasan metodologis yang kuat terkait keandalan simulasi numerik yang dilakukan [14].

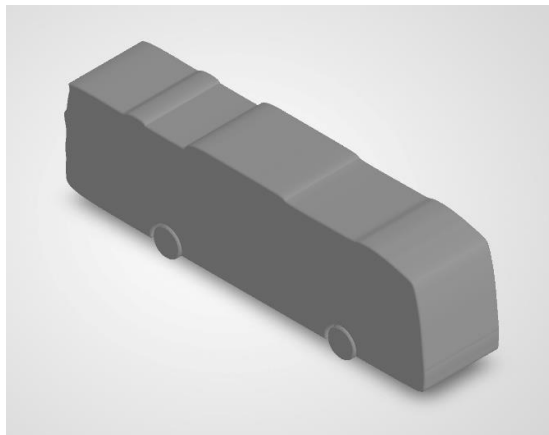
Manfaat penelitian ini dapat ditinjau dari sisi akademik maupun praktis. Dari sisi akademik, penelitian ini dapat menjadi referensi dalam kajian aerodinamika kendaraan besar berbasis CFD, terutama terkait praktik uji independensi mesh dan validasi koefisien aerodinamika. Dari sisi praktis, hasil penelitian dapat menjadi bahan pertimbangan bagi perancang bodi kendaraan dan industri karoseri untuk mengidentifikasi area bodi yang berpotensi menimbulkan separasi dan tekanan balik tinggi, sehingga dapat diarahkan pada pengembangan desain yang lebih efisien dan stabil. Kebaruan penelitian ini terletak pada analisis terpadu antara uji independensi grid dan evaluasi pengaruh variasi kecepatan terhadap Cd/Cl bus, sehingga hasil tidak hanya menunjukkan kecenderungan aerodinamika, tetapi juga menyediakan dasar numerik yang lebih dapat dipercaya untuk analisis dan pengembangan lanjutan [15].

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Model Fisik

Penelitian ini menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan pendekatan aliran eksternal untuk memprediksi karakteristik aerodinamika bus, yang dinyatakan melalui koefisien drag (C_d) dan koefisien lift (C_l). Seluruh simulasi dilakukan menggunakan ANSYS Fluent dengan asumsi aliran tunak (*steady-state*) dan fluida udara pada kondisi standar.

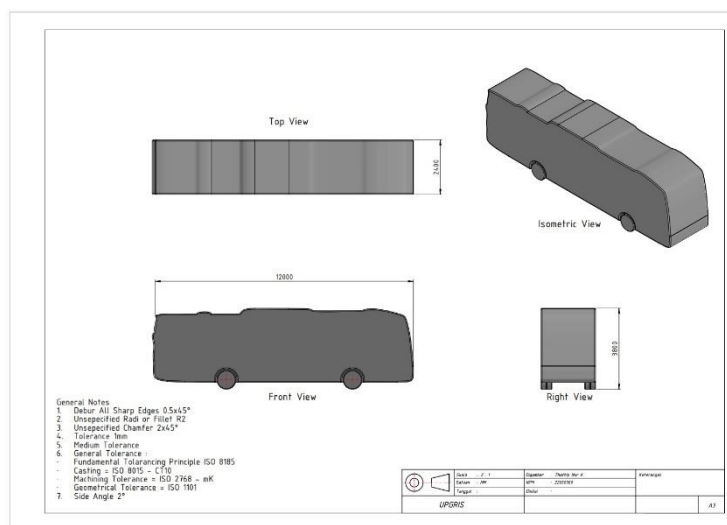
Geometri Model fisik yang digunakan dalam penelitian ini adalah bus SR3 SG yang direpresentasikan dalam bentuk geometri tiga dimensi menggunakan perangkat lunak *Computer-Aided Design* (CAD). Geometri bus dimodelkan dengan mempertimbangkan bentuk eksterior secara menyeluruh, mencakup kontur bodi, profil atap, panel samping, area kolong, serta geometri roda, sehingga mampu merepresentasikan kondisi aliran udara yang realistis di sekitar kendaraan. Dimensi utama bus yang digunakan dalam pemodelan ini meliputi panjang total bodi sebesar 12.000 mm, lebar bodi sebesar 2.500 mm, dan tinggi total kendaraan sebesar 3.800 mm,



Gambar 1. Model Fisik Bus

2.2 Desain Bus

Desain bus memiliki dimensi total panjang 12.000 mm, lebar 2.500 mm, dan tinggi 3.800 mm, yang menghasilkan *frontal area* sebesar 9,5 m² sebagaimana terlihat pada Gambar 1. Rasio antara panjang dan tinggi (*length-to-height ratio*) bus sebesar 3,16 mengindikasikan bahwa kendaraan ini termasuk dalam kategori *bluff body*, yaitu benda tumpul dengan hambatan aerodinamis yang relatif tinggi dibandingkan kendaraan berpenampang aerodinamis [12]. Selain itu, keberadaan geometri roda yang menonjol di bagian kolong kendaraan serta transisi bodi bagian bawah yang tidak menerus turut memperparah kompleksitas aliran di sekitar kendaraan, sehingga analisis distribusi tekanan dan gaya aerodinamis secara numerik menjadi sangat diperlukan untuk memahami karakteristik aliran secara komprehensif.

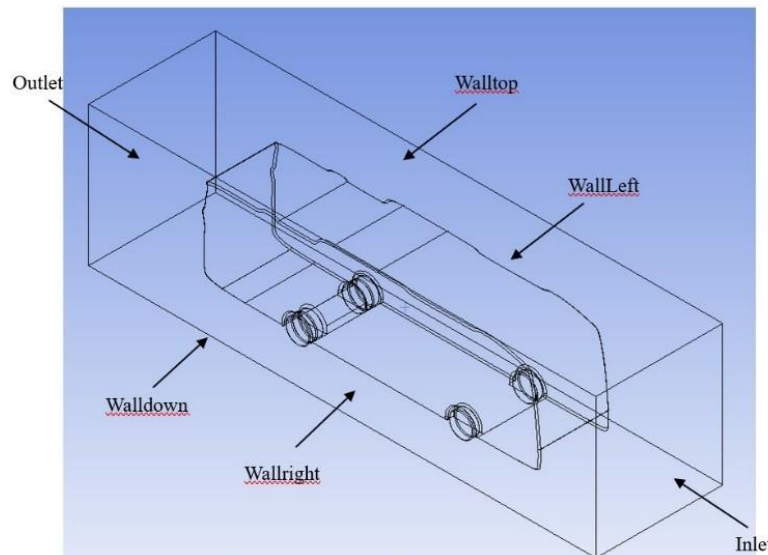


Gambar 2. Desain dan Ukuran Desain Bus

2.3 Studi Numerik

2.3.1 Domain Komputasi

Domain komputasi ditetapkan dalam bentuk *bounding box* persegi panjang tiga dimensi yang mengelilingi geometri bus. Penentuan dimensi domain mengacu pada rekomendasi standar simulasi aerodinamis kendaraan, di mana jarak dari permukaan depan bus ke bidang *inlet* ditetapkan sebesar 3 kali panjang bus (3L), jarak dari permukaan belakang ke bidang *outlet* sebesar 5 kali panjang bus (5L), serta jarak dari permukaan samping dan atap bus ke dinding lateral domain masing-masing sebesar 3 kali lebar dan 3 kali tinggi kendaraan, guna meminimalkan efek blokade (*blockage effect*) yang dapat memengaruhi akurasi distribusi tekanan dan kecepatan aliran [7], [9].



Gambar 3. Domain Komputasi dan Penentuan Kondisi Batas

Persamaan kontinuitas, momentum dan energi saat studi numerik:

Persamaan kontinuitas:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Dimana T adalah temperatur rata-rata permukaan bus dekat rak.

Persamaan momentum:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} \right) = \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

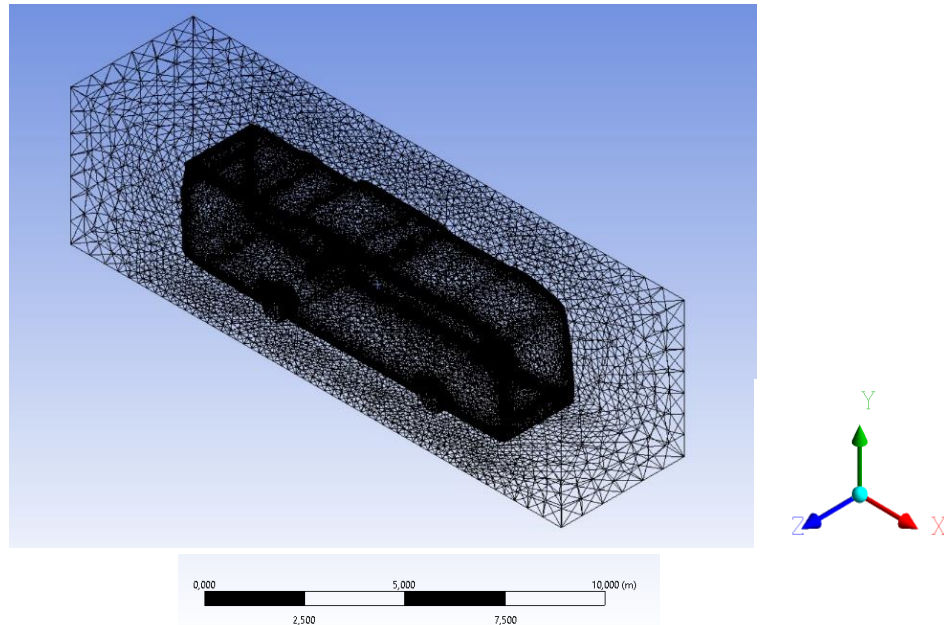
$$\rho \left(\frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial uw}{\partial y} + \frac{\partial uw^2}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + g(\rho - \rho_\infty) \quad (3)$$

2.3.2 Meshing

Proses Diskretisasi domain dilakukan menggunakan *mesh* (grid) dan ukuran *mesh* dinyatakan sebagai jumlah sel (cells). Untuk memastikan solusi tidak bergantung pada ukuran mesh, dilakukan uji independensi mesh pada kecepatan 100 km/jam dengan variasi jumlah sel yaitu 500.000, 1.000.000, 1.500.000, dan 2.000.000. Pemurnian mesh difokuskan pada area dekat dinding bodi bus dan daerah wake di belakang kendaraan, termasuk penerapan *inflation layer* pada permukaan bodi untuk menangkap *boundary layer*. Parameter inflation yang digunakan meliputi jumlah lapisan N layer, *growth rate* g , dan ketebalan lapisan pertama t_1 (atau target y^+ sebesar ... bila diterapkan).

Kriteria independensi mesh ditentukan berdasarkan perubahan C_d dan C_l yang semakin kecil pada pemurnian mesh berikutnya. Mesh dengan 2.000.000 sel dipilih untuk simulasi lanjutan karena memberikan perubahan C_d/C_l yang paling kecil dan hasil yang stabil.

Uji independensi grid (*grid independence test*) dilakukan dengan memvariasikan jumlah elemen mesh sebesar 500.000, 1.000.000, 1.500.000, dan 2.000.000 elemen pada kondisi operasi yang sama, yaitu kecepatan aliran sebesar 100 km/h, sehingga perubahan hasil simulasi hanya dipengaruhi oleh perbedaan jumlah grid. Parameter pembanding yang digunakan adalah nilai *drag force* (F_{drag}), karena parameter tersebut paling representatif dalam menggambarkan performa aerodinamis bus SR3 SG secara keseluruhan.



Gambar 4. Struktur Mesh Tetrahedral

2.3.3 Uji *Grid Independent*

Uji independensi mesh dilakukan dengan memvariasikan jumlah sel sebesar 500.000, 1.000.000, 1.500.000, dan 2.000.000 pada kondisi kecepatan yang sama, yaitu 100 km/jam. Parameter evaluasi yang digunakan adalah koefisien aerodinamika, meliputi koefisien drag (C_d) dan koefisien lift (C_l). Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai C_d menurun secara konsisten seiring pemurnian mesh, dari 0,943 pada mesh 500.000 sel menjadi 0,872 pada 1.000.000 sel, 0,786 pada 1.500.000 sel, dan mencapai 0,743 pada 2.000.000 sel, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 1. Perubahan C_d antara mesh 1.500.000 dan 2.000.000 sel relatif kecil dibandingkan tahap pemurnian sebelumnya, sehingga mesh 2.000.000 sel dipilih sebagai mesh yang memadai untuk simulasi lanjutan karena memberikan hasil yang lebih stabil dengan biaya komputasi yang tetap efisien [13].

Tabel 1. Data Hasil uji independensi mesh pada kecepatan 100 km/jam

Jumlah sel (cells)	Koefisien Drag, C_d	Koefisien Lift, C_l
500.000	0,943	0,118
1.000.000	0,872	0,123
1.500.000	0,786	0,123
2.000.000	0,743	0,127

2.3.4 Set Up Simulasi

Setup simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak CFD dengan mengaktifkan persamaan energi (*energy equation*) pada menu *Models*. Selanjutnya, model viskos ditetapkan menggunakan model turbulensi realizable $k-\epsilon$, yang umum digunakan untuk menganalisis aliran turbulen pada domain eksternal kendaraan. Pada bagian *Materials*, udara didefinisikan sebagai fluida kerja dengan densitas $1,225 \text{ kg/m}^3$ dan viskositas dinamis $1,789 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$, dengan asumsi aliran steady-state untuk merepresentasikan kondisi operasi kendaraan pada kecepatan

jelajah. Pada *Cell Zone Conditions*, zona fluida ditetapkan sebagai udara, kemudian pengaturan *Boundary Conditions* dilakukan dengan menerapkan *velocity inlet* sesuai variasi kecepatan pengujian yaitu 100, 110, 120, 130, dan 140 km/jam, serta *pressure outlet* sebesar 0 Pa (gauge).

Pada bagian *Reference Values*, nilai acuan ditentukan menggunakan opsi *Compute from Inlet* agar parameter referensi dihitung secara konsisten berdasarkan kondisi aliran masuk. Skema penyelesaian yang digunakan adalah SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*), dengan diskretisasi orde dua (*second order upwind*) untuk seluruh variabel mulai dari tekanan hingga besaran turbulensi guna meningkatkan akurasi hasil simulasi [6], [9]. Proses inialisasi dilakukan menggunakan *standard initialization* dengan opsi *Compute from Inlet*, kemudian simulasi dijalankan hingga sekitar 1.000 iterasi atau sampai residual dan parameter monitor mencapai kondisi konvergen. Hasil simulasi yang telah konvergen selanjutnya digunakan untuk analisis distribusi tekanan serta evaluasi koefisien aerodinamika (*Cd* dan *Cl*).

2.3.5 Validasi.

Tabel 2. Perbandingan koefisien aerodinamika eksperimen dan numerik pada mesh 2.000.000

Kecepatan (km/jam)	Cl exp	Cd exp	Cl num	Cd num
100	0,112	0,664	0,127	0,743
110	0,112	0,658	0,127	0,741
120	0,112	0,621	0,121	0,707
130	0,107	0,612	0,121	0,705
140	0,107	0,608	0,121	0,703

Hasil validasi menunjukkan bahwa koefisien drag (*Cd*) dan koefisien lift (*Cl*) yang diperoleh dari simulasi numerik berada pada rentang yang masih sebanding dengan data eksperimen, dengan deviasi yang relatif konsisten pada seluruh variasi kecepatan. Hal ini mengindikasikan bahwa model numerik yang digunakan telah mampu merepresentasikan kecenderungan aerodinamika secara stabil, sehingga layak dipakai untuk analisis pada variasi kecepatan berikutnya. Pada rentang kecepatan 100–140 km/jam, nilai *Cd* numerik berada pada kisaran 0,703–0,743 dan *Cl* numerik pada kisaran 0,121–0,127, sedangkan nilai eksperimen berada pada kisaran *Cd* 0,608–0,664 dan *Cl* 0,107–0,112 (Tabel 2). Perubahan *Cd* dan *Cl* terhadap variasi kecepatan pada rentang ini relatif kecil, namun menunjukkan pola yang konsisten antara hasil numerik dan eksperimen, sehingga memperkuat kesimpulan bahwa konfigurasi simulasi yang digunakan telah valid untuk mengevaluasi karakteristik aerodinamika [3], [6].

2.3.6 Reduksi Data

Secara umum, gaya aerodinamika dihitung dari resultan tekanan dan tegangan geser pada permukaan bodi kendaraan. Pada penelitian ini, nilai gaya diambil dari keluaran solver CFD dan dinyatakan sebagai komponen gaya pada arah sumbu aliran dan arah vertikal, sehingga dirumuskan sebagai berikut:

$$F_{Drag} = 1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot C_D \quad (4)$$

$$F_{Lift} = 1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot C_L \quad (5)$$

dengan (ρ) adalah densitas udara, (V) adalah kecepatan aliran bebas, (A) adalah luas referensi, (C_D) adalah koefisien drag, dan (C_L) adalah koefisien lift. Nilai (F_{Drag}) dan (F_{Lift}) selanjutnya digunakan untuk membandingkan pengaruh variasi grid serta variasi kecepatan terhadap karakteristik aerodinamika model bus.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN.

Pada bagian ini disajikan hasil dan pembahasan simulasi CFD yang mencakup uji independensi mesh, validasi terhadap data eksperimen, serta analisis karakteristik aliran di sekitar bodi kendaraan. Uji independensi mesh dilakukan terlebih dahulu untuk memastikan bahwa nilai koefisien aerodinamika yang diperoleh tidak dipengaruhi oleh kerapatan mesh, sehingga hasil simulasi bersifat stabil dan dapat dipercaya. Selanjutnya, model numerik divalidasi dengan membandingkan koefisien drag (*Cd*) dan koefisien lift (*Cl*) hasil simulasi terhadap data eksperimen pada variasi kecepatan 100–140 km/jam. Setelah model dinyatakan memadai, pembahasan difokuskan pada interpretasi distribusi tekanan, pola aliran, dan karakter wake yang terbentuk, serta keterkaitannya terhadap perubahan *Cd* dan *Cl* pada rentang kecepatan pengujian.

Tabel 3. Komparasi Validasi (Error *Cd* & *Cl*)

Kecepatan (km/jam)	Cd exp	Cd num	Error Cd (%)	Cl exp	Cl num	Error Cl (%)
--------------------	--------	--------	--------------	--------	--------	--------------

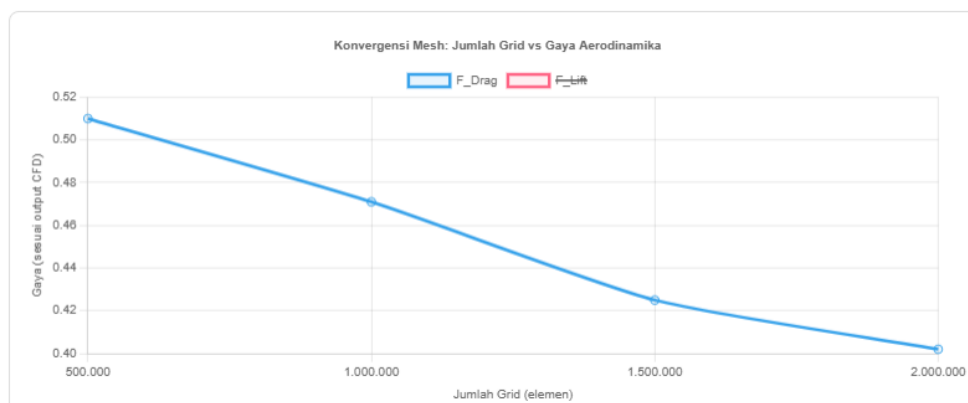
100	0,664	0,743	11,90	0,112	0,127	13,39
110	0,658	0,741	12,61	0,112	0,127	13,39
120	0,621	0,707	13,85	0,112	0,121	8,04
130	0,612	0,705	15,20	0,107	0,121	13,08
140	0,608	0,703	15,63	0,107	0,121	13,08

3.1 Pengaruh Jumlah Grid

Analisis pengaruh jumlah mesh dilakukan untuk memastikan hasil simulasi CFD tidak bergantung pada kerapatan mesh (*mesh independence*), sehingga koefisien aerodinamika yang diperoleh lebih andal untuk dianalisis pada tahap berikutnya. Variasi jumlah sel yang digunakan dalam studi ini adalah 500.000, 1.000.000, 1.500.000, dan 2.000.000 sel.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pemurnian mesh memengaruhi nilai koefisien aerodinamika, terutama koefisien drag (*C_d*). Pada mesh yang lebih kasar, ketelitian dalam menangkap gradien kecepatan, lokasi separasi aliran, dan distribusi tekanan di sekitar bodi masih terbatas, sehingga menghasilkan nilai *C_d* yang berbeda dibandingkan mesh yang lebih halus. Seiring peningkatan jumlah sel, prediksi *C_d* menjadi lebih stabil dan perubahan antar variasi mesh semakin kecil, yang mengindikasikan tercapainya kondisi *mesh independence*.

Berdasarkan perbandingan nilai *C_d* pada setiap variasi mesh, *C_d* menurun dari 0,943 pada mesh 500.000 sel menjadi 0,743 pada mesh 2.000.000 sel. Tren ini menunjukkan bahwa mesh yang lebih halus menghasilkan prediksi koefisien yang lebih konvergen. Dengan mempertimbangkan kestabilan perubahan hasil serta efisiensi komputasi, mesh 2.000.000 sel dipilih sebagai mesh yang memadai dan digunakan untuk analisis pengaruh variasi kecepatan pada pembahasan selanjutnya.



Gambar 5. Grafik Konversi Mesh

3.2 Pengaruh Kecepatan

Pada bagian ini dianalisis pengaruh variasi kecepatan aliran terhadap karakteristik aerodinamika model Bus berdasarkan hasil simulasi CFD. Variasi kecepatan yang digunakan adalah 100 km/h, 110 km/h, 120 km/h, 130 km/h, dan 140 km/h. Parameter utama yang dievaluasi meliputi pola aliran di sekitar bodi (melalui *streamline*), distribusi kecepatan (melalui *velocity contour*), dan distribusi tekanan permukaan (melalui *pressure contour*), serta keterkaitannya terhadap perubahan nilai gaya aerodinamika.

Secara umum, peningkatan kecepatan aliran menyebabkan intensitas interaksi fluida–bodi meningkat, sehingga gradien kecepatan, separasi aliran, dan perbedaan tekanan antara bagian depan dan belakang bus menjadi lebih dominan. Kondisi ini berdampak langsung pada kenaikan gaya hambat (*drag force*) dan gaya angkat (*lift force*). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai gaya aerodinamika cenderung meningkat seiring bertambahnya kecepatan, yang selaras dengan teori aerodinamika bahwa gaya aerodinamis berbanding lurus dengan kuadrat kecepatan aliran.

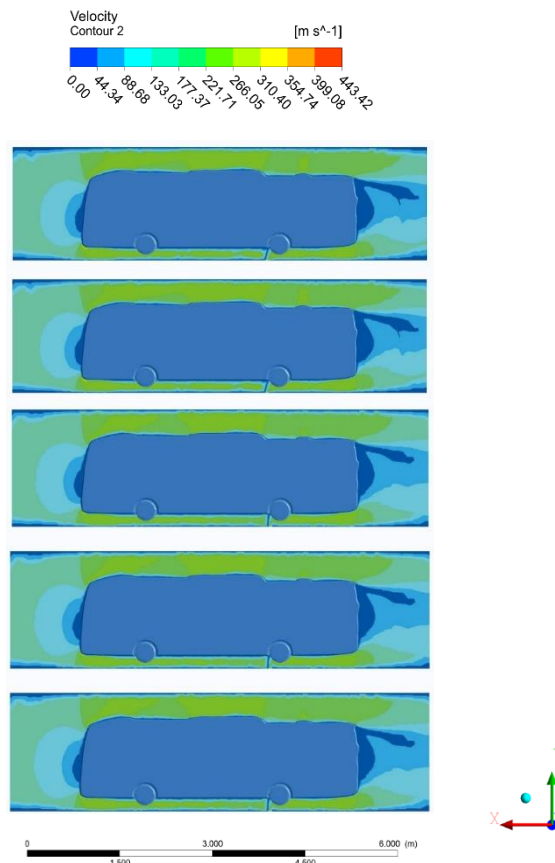
3.2.1 Distribusi Kecepatan (*Velocity Contour*)

Kontur kecepatan digunakan untuk menunjukkan sebaran percepatan dan perlambatan aliran pada area depan, samping, atas, dan terutama belakang bus. Pada bagian depan bus terjadi perlambatan aliran hingga mendekati nol di sekitar titik stagnasi, sedangkan pada sisi-sisi bodi dan atap terjadi percepatan aliran akibat perubahan geometri dan penyempitan jalur aliran. Di bagian belakang bus, terbentuk zona kecepatan rendah (daerah *wake*) akibat terjadinya separasi aliran. Ketika kecepatan dinaikkan dari 100 km/h hingga 140 km/h, pola umum distribusi kecepatan tetap

serupa, namun intensitasnya meningkat dan area *wake* cenderung semakin jelas, yang menandakan meningkatnya kehilangan energi aliran serta kontribusi hambatan tekanan.

Distribusi kecepatan aliran di sekitar bodi kendaraan dianalisis menggunakan *velocity contour* untuk mengidentifikasi percepatan aliran, daerah perlambatan, serta lokasi terjadinya separasi. Pada bagian depan bodi, aliran mengalami perlambatan hingga mendekati nol pada titik stagnasi akibat tumbukan langsung aliran terhadap permukaan, sehingga membentuk zona berkecepatan rendah dan tekanan relatif tinggi. Setelah melewati bagian depan, aliran cenderung mengalami percepatan di area yang menyempit atau melengkung mengikuti kontur bodi, yang ditunjukkan oleh gradien kecepatan yang meningkat di sekitar sisi dan atap kendaraan.

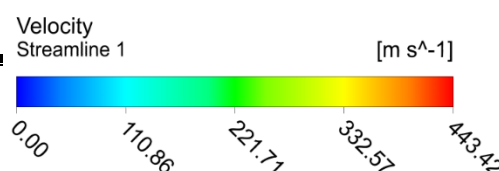
Pada bagian samping dan atap, pola *velocity contour* memperlihatkan adanya lapisan batas (*boundary layer*) yang berkembang sepanjang permukaan bodi. Seiring bertambahnya jarak aliran dari titik stagnasi, lapisan batas menjadi lebih tebal dan kecepatan dekat dinding tetap rendah akibat kondisi *no-slip*. Pada kondisi tertentu, terutama ketika gradien tekanan berlawanan arah (*adverse pressure gradient*) meningkat, lapisan batas dapat kehilangan energi dan memicu separasi aliran. Gejala separasi ini umumnya ditunjukkan oleh terbentuknya zona kecepatan rendah yang melebar dan tidak lagi mengikuti kontur bodi secara menempel.

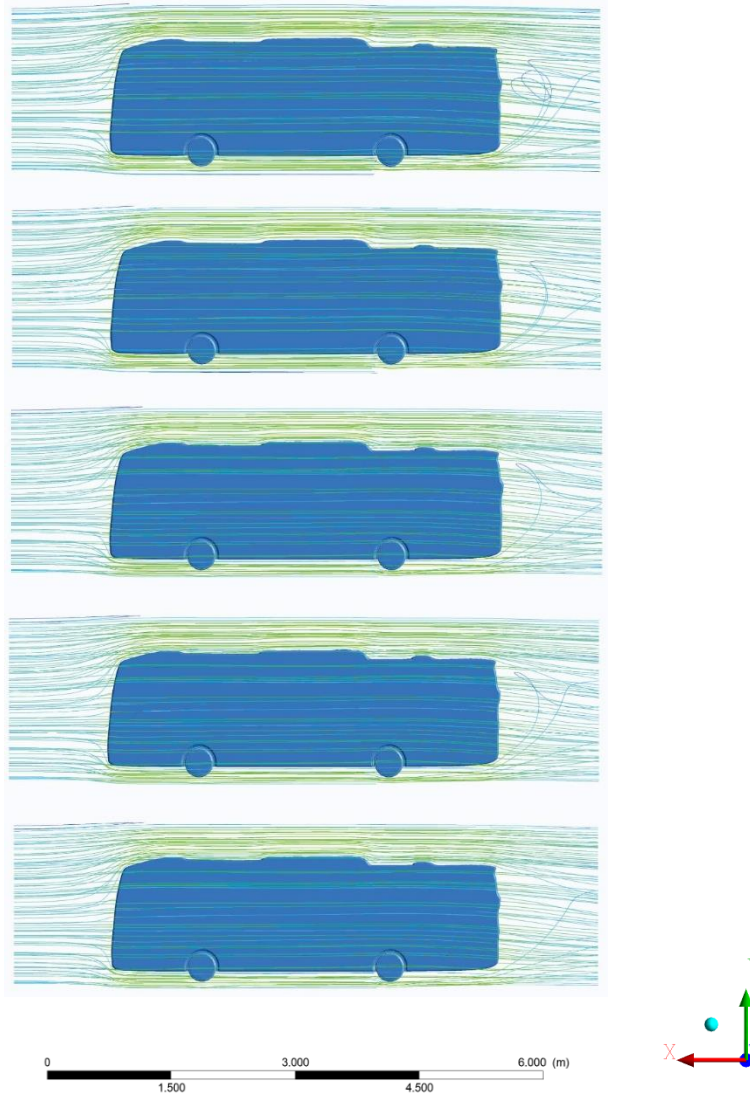


Gambar 6. Simulasi Distribusi Kecepatan Variasi Kecepatan

3.2.2 Garis Aliran (*Streamline*)

Visualisasi *streamline* menunjukkan arah dan keteraturan aliran di sekitar bodi bus. Pada kecepatan rendah dalam rentang pengujian, aliran mengikuti kontur bodi pada bagian depan dan samping, kemudian mengalami separasi pada bagian belakang sehingga membentuk vorteks dan daerah resirkulasi. Peningkatan kecepatan menyebabkan struktur vorteks dan daerah resirkulasi di belakang bus menjadi lebih kuat dan lebih tegas, yang mengindikasikan peningkatan turbulensi serta penurunan tekanan pada area belakang. Fenomena ini berkontribusi terhadap bertambahnya *pressure drag* karena selisih tekanan antara bagian depan (tekanan tinggi) dan belakang (tekanan rendah) semakin besar.

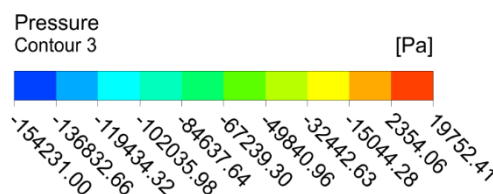


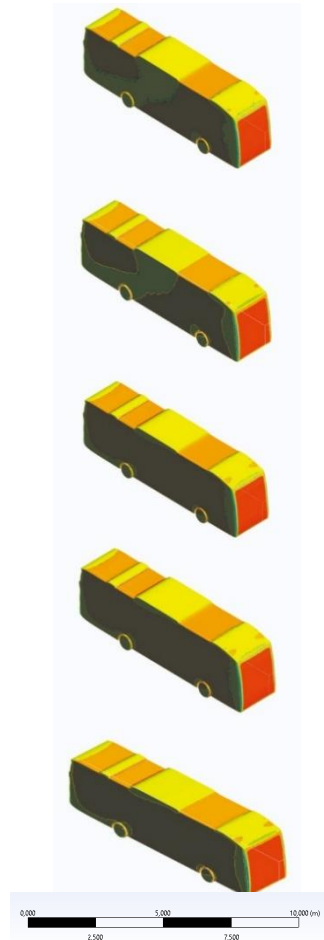


Gambar 7 . Simulasi Distribusi Streamline Variasi Kecepatan

3.2.3 Distribusi Tekanan (*Pressure Contour*)

Kontur tekanan pada permukaan bodi digunakan untuk mengidentifikasi lokasi tekanan maksimum dan minimum yang menjadi penyebab utama hambatan tekanan. Pada bagian depan bus terlihat daerah tekanan tinggi akibat terjadinya stagnasi aliran, sedangkan pada area belakang bus terbentuk tekanan rendah karena separasi aliran dan terbentuknya *wake*. Seiring peningkatan kecepatan, besar tekanan dinamis meningkat sehingga nilai tekanan maksimum di bagian depan dan penurunan tekanan di bagian belakang menjadi semakin ekstrem. Akibatnya, selisih tekanan depan–belakang meningkat dan menghasilkan kenaikan gaya hambat secara keseluruhan.

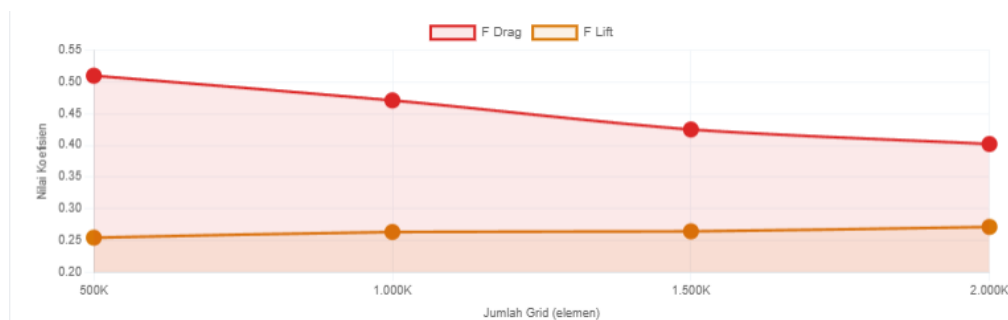




Gambar 8. Simulasi Distribusi Pressure Variasi Kecepatan

3.3 Pengaruh Variasi Kecepatan terhadap *Drag Force* dan *Lift Force*

Pengaruh variasi kecepatan operasional terhadap nilai *drag force* (F_{drag}) dan *lift force* (F_{lift}) bus pada grid optimum 2.000.000 elemen disajikan pada Tabel 2. Nilai F_{drag} menunjukkan peningkatan yang konsisten seiring bertambahnya kecepatan operasional, yaitu dari 0,42 pada kecepatan 100 km/h, meningkat menjadi 0,586 pada 110 km/h, 0,794 pada 120 km/h, 1,09 pada 130 km/h, dan mencapai 1,461 pada kecepatan 140 km/h. Tren kenaikan yang serupa ditunjukkan pula oleh nilai F_{lift} , yaitu dari 0,271 pada kecepatan 100 km/h, meningkat menjadi 0,397 pada 110 km/h, 0,538 pada 120 km/h, 0,74 pada 130 km/h, dan mencapai 0,994 pada kecepatan 140 km/h. Peningkatan kedua parameter tersebut secara konsisten mengikuti pola kuadratik yang selaras dengan teori aerodinamis yang menyatakan bahwa *drag force* dan *lift force* bersifat proporsional terhadap kuadrat kecepatan aliran ($F \propto V^2$), sehingga peningkatan kecepatan akan memperburuk beban aerodinamis kendaraan secara eksponensial.



Gambar 9. Grafik Uji Independensi Drag Force dan Lift Force

Hal ini mengkonfirmasi bahwa karakteristik *bluff body* bus menjadikan *pressure drag* sebagai komponen dominan hambatan aerodinamis total kendaraan, sehingga optimasi geometri bagian belakang bodi menjadi prioritas utama dalam upaya mereduksi hambatan aerodinamis bus secara keseluruhan demi tercapainya efisiensi energi dan stabilitas kendaraan yang lebih baik pada kecepatan tinggi [9], [11].

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa hasil simulasi CFD yang dilaporkan sebagai koefisien drag (C_d) dan koefisien lift (C_l) (tanpa satuan) telah memenuhi uji independensi mesh dan validasi eksperimen pada rentang kondisi yang diuji. Uji independensi mesh pada 100 km/jam menunjukkan C_d menurun dari 0,943 (500.000 sel) menjadi 0,743 (2.000.000 sel) dan C_l relatif stabil pada 0,118–0,127, sehingga mesh 2.000.000 sel dipilih sebagai mesh yang memadai untuk simulasi lanjutan. Validasi pada kecepatan 100–140 km/jam menghasilkan C_d numerik 0,703–0,743 dan C_l numerik 0,121–0,127, sedangkan eksperimen menunjukkan C_d 0,608–0,664 dan C_l 0,107–0,112, dengan deviasi yang konsisten yaitu error C_d 11,90–15,63% dan error C_l 8,04–13,39%, sehingga model numerik layak digunakan untuk analisis kecenderungan aerodinamika dan interpretasi fenomena aliran pada kendaraan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan Terima Kasih Penulis berterima kasih kepada atas dukungan fasilitas komputasi yang digunakan selama penelitian ini. Kami juga berterima kasih kepada yang telah memberikan saran teknis sehingga simulasi dan analisis aerodinamis kendaraan ini dapat diselesaikan dengan baik.

REFERENCES

- [1] S. R. Ahmed, G. Ramm, and G. Faltin, "Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake." in SAE Technical Paper Series. 2020. doi: 10.4271/840300.
- [2] A. Altaf, A. A. Omar, and W. Asrar, "Passive drag reduction of square back road vehicles," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 134, pp. 30–43, 2021, doi: 10.1016/j.jweia.2014.08.006.
- [3] B. Chaouat, "The state of the art of hybrid RANS/LES modeling for the simulation of turbulent flows," *Flow Turbul. Combust.*, vol. 99, no. 2, pp. 279–327, 2020, doi: 10.1007/s10494-017-9828-8.
- [4] C. A. J. Fletcher and G. D. Stewart, "Bus drag reduction by the trapped vortex concept for a single bus and two buses in tandem," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 24, no. 2, pp. 143–168, 2021, doi: 10.1016/0167-6105(86)90004-8.
- [5] D. Garcia-Ribeiro *et al.*, "Drag reduction of a commercial bus with add-on aerodynamic devices," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J. Automob. Eng.*, vol. 237, no. 7, pp. 1623–1636, 2023, doi: 10.1177/09544070221098209.
- [6] K. He, G. Minelli, J. Wang, G. Gao, and S. Krajnović, "Assessment of LES, IDDES and RANS approaches for prediction of wakes behind notchback road vehicles," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 217, p. 104737, 2021, doi: 10.1016/j.jweia.2021.104737.

- [7] T. Huang *et al.*, “Comparative analysis of turbulence models for evaluating the aerodynamic characteristics of bus,” *J. Appl. Fluid Mech.*, vol. 17, no. 7, pp. 1354–1367, 2024, doi: 10.47176/jafm.17.7.2342.
- [8] S. Kanekar, P. Thakre, and E. Rajkumar, “Aerodynamic study of state transport bus using computational fluid dynamics,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 263, no. 6, p. 062052, 2024, doi: 10.1088/1757-899X/263/6/062052.
- [9] C. R. Jadhav and R. P. Chorage, “Modification in commercial bus model to overcome aerodynamic drag effect by using CFD analysis,” *Results Eng.*, vol. 6, p. 100091, 2020, doi: 10.1016/j.rineng.2019.100091.
- [10] M. H. Kim, “Numerical study on the wake flow characteristics and drag reduction of large-sized bus using rear-spoiler,” *Int. J. Veh. Des.*, vol. 34, no. 3, pp. 203–217, 2004, doi: 10.1504/IJVD.2004.004014.
- [11] S. Krajnović and L. Davidson, “Numerical study of the flow around a bus-shaped body,” *J. Fluids Eng.*, vol. 125, no. 3, pp. 500–509, 2020, doi: 10.1115/1.1567305.
- [12] F. R. Menter, “Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications,” *AIAA J.*, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605, 2021, doi: 10.2514/3.12149.
- [13] E. Serre *et al.*, “On simulating the turbulent flow around the Ahmed body: A French–German collaborative evaluation of LES and DES,” *Comput. Fluids*, vol. 78, pp. 10–23, 2023, doi: 10.1016/j.compfluid.2011.05.017.
- [14] T.-H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, and J. Zhu, “A new $k-\epsilon$ eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows: Model development and validation,” *Comput. Fluids*, vol. 24, no. 3, pp. 227–238, 2021, doi: 10.1016/0045-7930(94)00032-T.
- [15] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*, 2nd ed. Pearson Education Limited, 2020.